

УДК 681.5:620.93

**РОЗРОБКА МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА
ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ****Самелюк О. С., Черніченко М. Ю., Шевченко К. Л.**

Київський національний університет технологій та дизайну

У статті розглянуто оцінку динамічної похибки багатоконтурної системи за допомогою методу вписаних трапецій та структурний метод вимірювання значень відносної похибки вимірювання усталеного відхилення напруги. Встановлено, що оцінка та визначення великих та малих інформативних показників якості електроенергії, є важливим заходом для контролю за рівнем якості електричної енергії. Наведені теоретичні та експериментальні результати досліджень параметрів та якості електроенергії.

Ключові слова: електроенергія, показники якості, динамічна похибка, відносна похибка, структурний метод, метод трапецій

Електрична енергія як і всі інші енергоносії характеризується обсягами її споживання та рівнем якості. Обидві ці характеристики досить жорстко пов'язані між собою, оскільки режими електроспоживання впливають на характеристики електричної енергії, які в нормативних документах називаються «показниками якості електроенергії». Найбільш вагомим показником електроенергії є похибка вимірювання обсягів та параметрів якості електричної енергії. Це призводить до необхідності створення системного підходу до вирішення задачі обліку електричної енергії з урахуванням показників її якості.

Постановка завдання

Метою роботи є розробка нового методу вимірювання інформативних складових напруги на фоні неінформативних та розробка основних положень та принципів побудови засобів вимірювання перехідних процесів і створення на їх основі засобів метрологічного забезпечення.

Об'єктом дослідження є трифазна мережа промислової частоти $50 \pm 2,5$ Гц.

Предметом дослідження є методи створення засобів перетворення, відтворення кількісних та якісних параметрів електричної енергії на тлі неінформативних параметрів, використовуючи не прямі перетворення параметрів.

Результати досліджень

Багатоконтурні вимірювальні системи широко використовуються для вимірювання параметрів швидкоплинних процесів [1]. Тому важливе значення має

визначення похибок цих систем. Динамічна похибка може бути апроксимована за допомогою коефіцієнтів ряду Тейлора, а її знаходження полягає у визначенні коефіцієнтів цього ряду, які називаються факторами помилки.

Повну інформацію про якість системи зі зворотним зв'язком містить її відповідь на одиничний стрибок, що викликає максимальну динамічну похибку [2].

У той же самий час динамічна похибка може бути визначена у частотній області за допомогою амплітудно-частотної і фазо-частотної характеристик операційних ланок і системи в цілому.

Розглянемо частину структурної схеми вимірювальної системи (рис. 1), обведену пунктирною лінією, як дві ланки, з'єднані із суматором: перша містить у собі вузол з коефіцієнтом передачі k_a і два інших каскади, з'єднаних в операційну ланку з загальною передатною функцією $k_b k_c$.

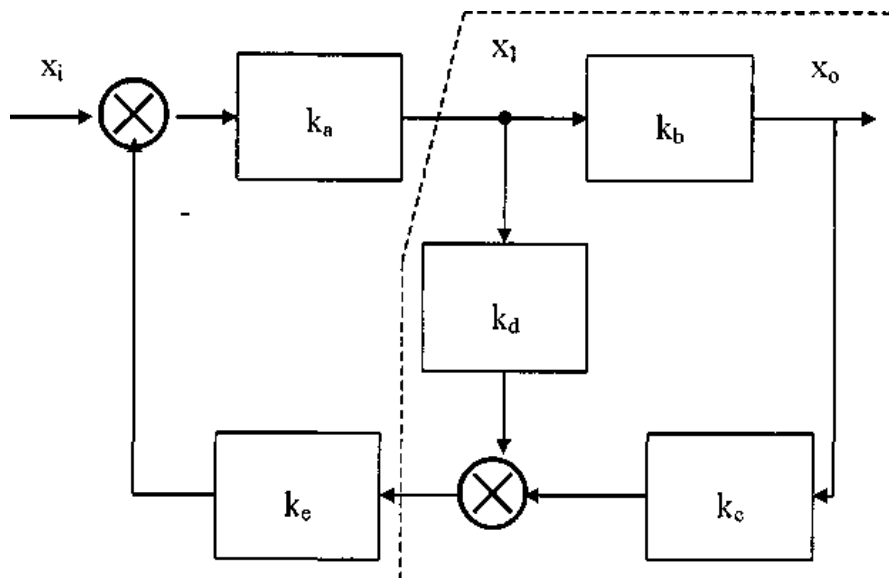


Рис. 1. Структурна схема багатоконтурної вимірювальної системи

Найбільш зручний шлях вирішення проблеми є шлях визначення передатної функції $\frac{X_1}{X_i(p)}$, що описує систему (1):

$$\frac{X_1(p)}{X_i(p)} = \frac{k_a}{1 + k_a k_d k_e + k_a k_b k_c k_e} \quad (1)$$

Звідки очевидно, що (2):

$$\frac{k_1}{k_2}(p) = [(k_a k_b)^{-1} + k_d k_e (k_b)^{-1} + k_c k_e] \quad (2)$$

Застосовуємо метод вбудованих трапецій, для перетворення частотної характеристики в одиничний відгук. Для цього потрібно розглянути частотну

характеристику системи (рис. 2). Графічно вписуємо трапеції в частотну характеристику системи (рис. 3).

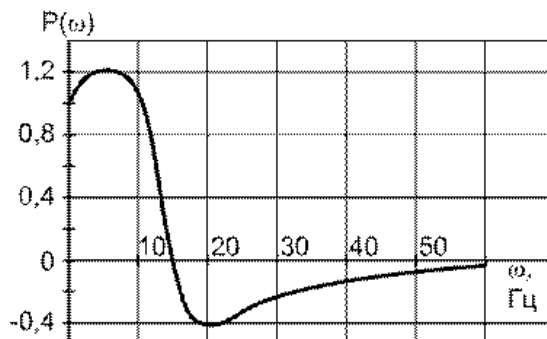


Рис. 2. Частотна характеристика системи

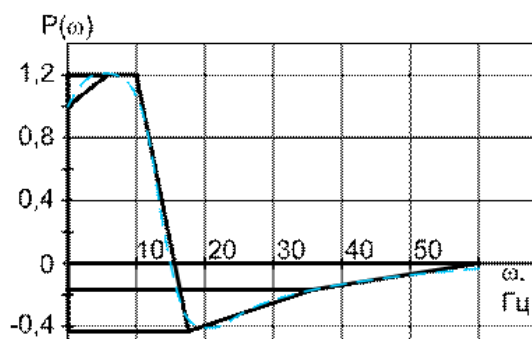


Рис. 3. Частотна характеристика системи з вписаними трапеціями

Для визначення параметрів отриманих трапецій виконується побудова всіх трапецій на окремій координатній сітці (аналогічно координатній сітці реальної частотної характеристики системи), з урахуванням масштабу і знака: збільшення ординати $P(\omega)$ відповідає негативним висотам трапецій, а зменшення – позитивним.

Для кожної трапеції визначаються: висота – p , частоти зрізу – ω_c і зламу – ω_d за якими визначають коефіцієнт нахилу бічної грані (рис. 4) та вносяться до табл. 1.

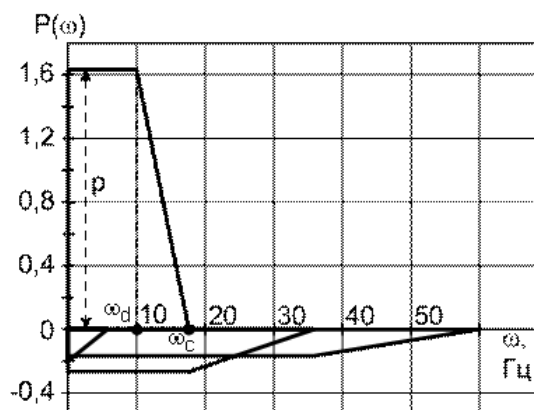


Рис. 4. Графічне визначення параметрів вписаних трапецій

Таблиця 1

Параметри трапецій

№	p	ω_c	ω_d	$\alpha = \omega_d/\omega_c$
1	-0.2	5	0	0
2	1.61	18	10	0.56
3	-0.28	35	18	0.51
4	-0.18	60	35	0.58

Використовуючи таблицю професора В. В. Солодовникова (табл. 2) $h(t)$ та формулу (3) розраховуємо параметри перехідної характеристики (табл. 3) та будуємо нашу перехідну характеристику за допомогою графічного додавання (рис. 5).

$$(h(t_0); t_0) \rightarrow (x_i(t); t) = \left(p \times h(t_0); \frac{t_0}{\omega_c} \right) \quad (3)$$

Перехідний процес для одиничних трапецієподібних кривих з коефіцієнтом нахилу α визначається h -функцією $h(t)$. За професором В.В. Солодовниковим, таблиця складається зі значень для цих функцій у різні періоди часу t і для різних коефіцієнтів нахилу α .

Таблиця 2

Значення $h(t)$ професора В. В. Солодовникова

$\alpha \backslash t$	0	0,05	0,1	0,15
0	0	0	0	0
0,5	0,138	0,168	0,176	0,184
1	0,31	0,3	0,34	0,356
1,5	0,5	0,47	0,49	0,596

Таблиця 3

Розрахункові параметри h функцій для трапецій

t	$h_1(t)$ при $\alpha=0$	$h_i(t)$			x	y_1	y_2	y_3	y_4
		$\alpha=0,5$	$\alpha=0,55$	$\alpha=0,6$					
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	0,138	0,24	0,248	0,255	0,1	-0,0276	0,39928	-0,0672	-0,0459
1	0,31	0,461	0,476	0,49	0,2	-0,062	0,76636	-0,1291	-0,0882
1,5	0,449	0,665	0,685	0,706	0,3	-0,0898	1,10285	-0,1862	-0,1271
2	0,571	0,831	0,866	0,878	0,4	-0,1142	1,39426	-0,2327	-0,158
2,5	0,674	0,967	0,985	1,01	0,5	-0,1348	1,58585	-0,2708	-0,1818
3	0,755	1,061	1,081	1,1	0,6	-0,151	1,74041	-0,2971	-0,198
3,5	0,815	1,115	1,132	1,145	0,7	-0,163	1,82252	-0,3122	-0,2061
4	0,856	1,141	1,151	1,158	0,8	-0,1712	1,85311	-0,3195	-0,2084
4,5	0,883	1,138	1,141	1,141	0,9	-0,1766	1,83701	-0,3186	-0,2054
5	0,895	1,117	1,114	1,107	1	-0,179	1,79354	-0,3128	-0,1993
5,5	0,9	1,09	1,076	1,064	1,1	-0,18	1,73236	-0,3052	-0,1915
6	0,903	1,051	1,036	1,02	1,2	-0,1806	1,66796	-0,2943	-0,1836
6,5	0,904	1,018	1,001	0,982	1,3	-0,1808	1,61161	-0,285	-0,1768
7	0,904	0,992	0,975	0,957	1,4	-0,1808	1,56975	-0,2778	-0,1723
7,5	0,907	0,974	0,956	0,944	1,5	-0,1814	1,53916	-0,2727	-0,1699
8	0,911	0,966	0,952	0,941	1,6	-0,1822	1,53272	-0,2705	-0,1694
8,5	0,918	0,964	0,954	0,948	1,7	-0,1836	1,53594	-0,2699	-0,1706
9	0,925	0,968	0,962	0,961	1,8	-0,185	1,54882	-0,271	-0,173
9,5	0,932	0,975	0,972	0,977	1,9	-0,1864	1,56492	-0,273	-0,1759
10	0,939	0,982	0,984	0,993	2	-0,1878	1,58424	-0,275	-0,1787

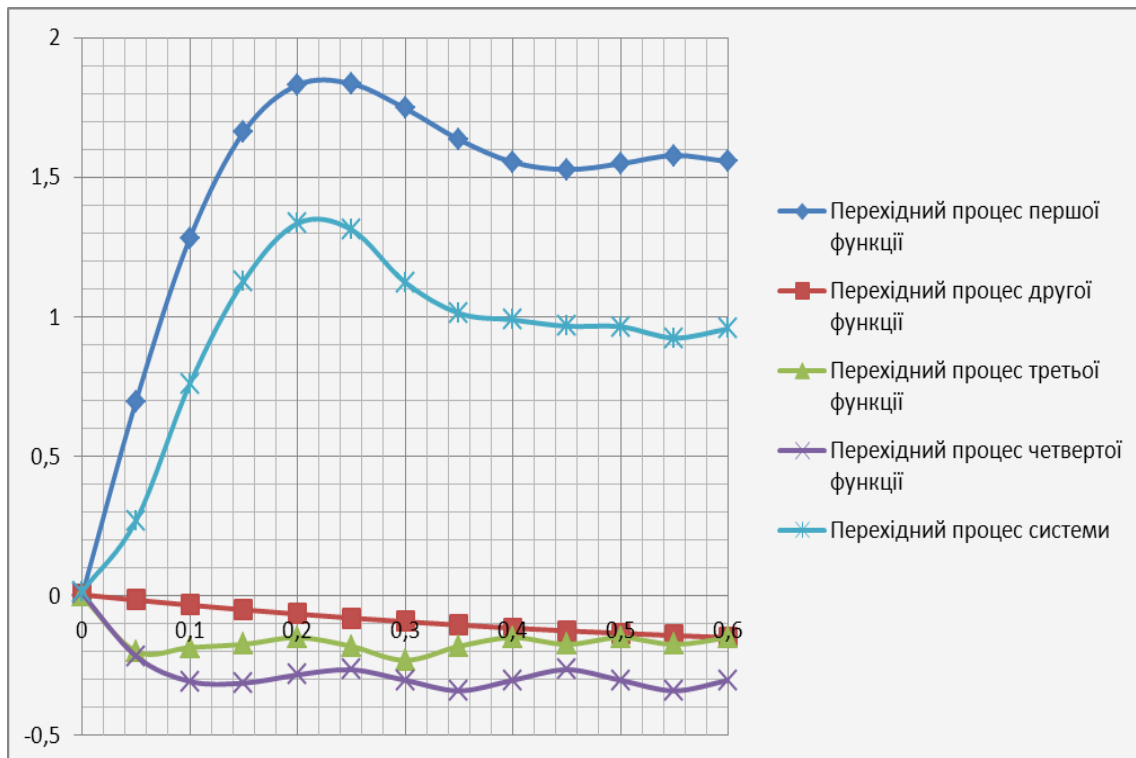


Рис. 5. Побудова кривої перехідного процесу

За допомогою методу вписаних трапецій та таблиці значень перехідних функцій професора В. В. Солодовникова, можливе покращення кривої перехідного процесу системи для графічного визначення таких показників якості, як перерегулювання, час установлення першого максимуму, кількість коливань, частота коливань. Дані показники якості визначаються перехідний процес, що викликаний сигналом у вигляді одиночного включення, тобто динамічної похибки одиночного стрибка.

Динамічна похибка системи являє собою достатньо великий інформативний показник якості електроенергії. Складною задачею є вимірювання малих інформативних параметрів на фоні великих інформативних параметрів, оскільки вони їх приховують.

Малими інформативними показниками якості електроенергії є усталене відхилення δU_y і розмах зміни δU_t напруги, коефіцієнти несиметрії напруги нульової K_{0U} і зворотної K_{2U} послідовностей, коефіцієнт спотворення синусоїдної форми кривої напруги K_U , коефіцієнт n-ї гармонічної складової напруги K_{Un} [3].

Це можна вирішити застосувавши структурний метод підвищення точності вимірювання δU_y^H , структурна схема якого зображена на рис. 6. До її складу входять регульований селективний підсилювач (РСП₁), підсилювач-обмежувач (ПО), ключ (К),

диференціальний підсилювач (ДП), джерело опорної напруги (ДОН), фільтр симетричних складових прямої послідовності (ФССПП), регульований селективний підсилювач (РСП₂), синхронний детектор (СД), фільтр нижніх частот (ФНЧ), формувач опорної трифазної системи напруг (ФОТСН), цифровий розщеплювач фаз (ЦРФ), три диференціальних підсилювачі (ДП₁, ДП₂, ДП₃), перетворювач періоду в код (ППК), виконавчий блок (ВБ) та блок реєстрації БР.

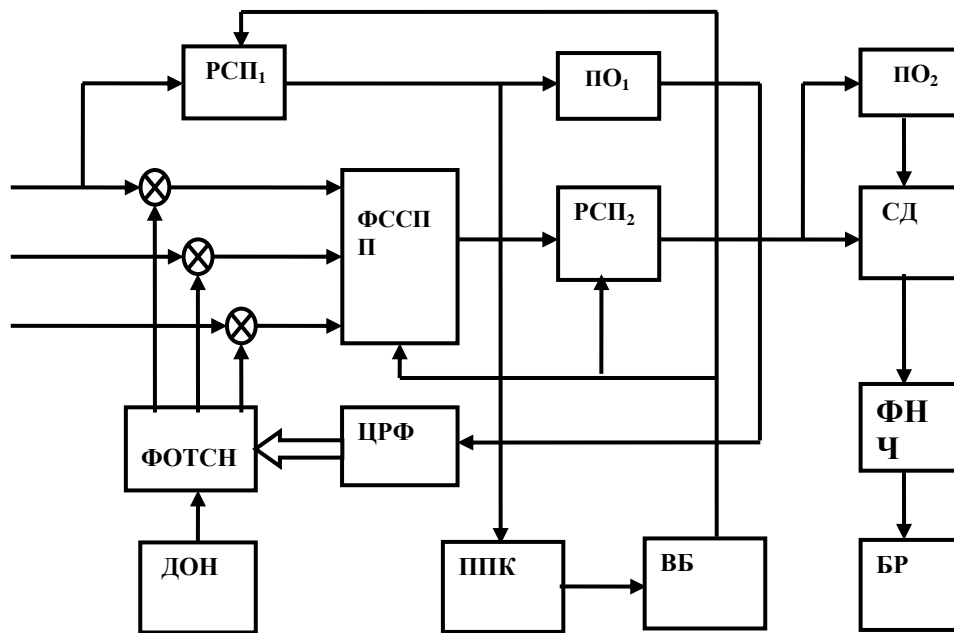


Рис. 6. Структурна схема виділення відхилення напруги з компенсацією неінформативного параметра

За допомогою РСП₁ і ПО₁ формується імпульсний сигнал, нуль-переходи якого жорстко пов'язані з нуль-переходами напруги фази А мережі. Цей сигнал надходить на ЦРФ, де здійснюється формування трифазної системи імпульсних напруг, рівних між собою за амплітудою і зсунутих у часі на $T/3$. Пофазне віднімання опорної трифазної напруги основної частоти з трифазної напруги мережі здійснюється за допомогою диференціальних підсилювачів ДП₁-ДП₃, у результаті чого на виході ДП₁-ДП₃ утворюється трифазна система векторів, яка складається з напруг зворотної, нульової і не скомпенсованої прямої напруги.

Трифазна система напруг з методу симетричних складових може бути представлена у вигляді (4):

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{U}_0 \\ \bar{U}_+ \\ \bar{U}_- \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де $\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{U}_3$ – вектори фазних напруг мережі; $\bar{U}_0, \bar{U}_+, \bar{U}_-$ – вектори симетричних складових нульової, прямої і зворотної напруги трифазної мережі.

Трифазна симетрична система векторів номінальних напруг має вигляд (5):

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{U}_+^H \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

де \bar{U}_+^H номінальне значення вектора напруги.

Після віднімання (4) із (5) одержимо (6):

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{U}_1 \\ \Delta \bar{U}_2 \\ \Delta \bar{U}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{U}_0 \\ \delta \bar{U}_+ \\ \bar{U}_- \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де $\Delta \bar{U}_1, \Delta \bar{U}_2, \Delta \bar{U}_3$ – трифазна система різниці векторів, отримана на виходах ДУ₁-ДУ₃ після віднімання; $\delta \bar{U}_+$ – вектор відхилення напруги прямої послідовності від номінального значення.

З (6) випливає, що у вимірювальний канал надходить трифазна напруга, яка не містить неінформативного параметра. Виходячи з цього, вираз (7) стосовно схеми, зображеної на рис. 6, набуде вигляду:

$$\begin{aligned} \delta U_y &= \delta U_y^H + \Delta U_y' = (U_{(1)1} - U_{(1)1}^H) \times K_1^H (1 + \gamma_1) K_{2-1}^H (1 + \gamma_2') K_{3-1}^H (1 + \gamma_3') = \\ &= \delta U_y \times K_1^H K_{2-1}^H K_{3-1}^H + \delta U_y \times K_1^H K_{2-1}^H K_{3-1}^H (\gamma_1 + \gamma_2' + \gamma_3'), \end{aligned} \quad (7)$$

де $\delta U_y = \delta U_y \times K_1^H K_{2-1}^H K_{3-1}^H$; $\Delta U_y' = \delta U_y \times K_1^H K_{2-1}^H K_{3-1}^H (\gamma_1 + \gamma_2' + \gamma_3')$.

Відносна похибка вимірювання усталеного відхилення напруги матиме вигляд (8):

$$\gamma_{\delta U_y'} = \frac{\Delta U_y'}{\delta U_y^H} = \gamma_1 + \gamma_2' + \gamma_3', \quad (8)$$

Реальні значення похибок γ_1, γ_2 і γ_3 мають граничні значення, рівні відповідно 0,05, 0,1 і 0,2% . Підставивши в (8) значення похибок, одержимо $\gamma_{\delta U_y'} = 0,35\%$.

Таким чином, застосування структурного методу вимірювання дозволяє практично цілком виключити вплив неінформативного параметра на точність перетворення показників якості електроенергії.

Підставивши у формулу (8) значення похибок γ_1 , γ_2' , γ_3' з розрахункових даних, що наведені в таблиці 4, побудуємо графік залежності похибки від напруги для структурного методу (рис. 7).

Таблиця 4

Розрахункові дані

$U_{(1)1}$	$\delta U_o'$	γ_1	γ_2'	γ_3'	$\Delta\alpha$	$\gamma_{\delta U_y'}$
110	5.1	0.055	0.11	0.22	0.01	0.014
111	5.2	0.056	0.111	0.222	0.01	0.015
112	5.25	0.056	0.112	0.224	0.01	0.015
113	5.3	0.057	0.113	0.226	0.01	0.015
114	5.32	0.057	0.114	0.228	0.01	0.015
115	5.35	0.058	0.115	0.23	0.01	0.015
116	5.4	0.058	0.116	0.232	0.01	0.015
117	5.45	0.059	0.117	0.234	0.01	0.015
118	5.5	0.059	0.118	0.236	0.01	0.015
119	5.6	0.06	0.119	0.238	0.01	0.016

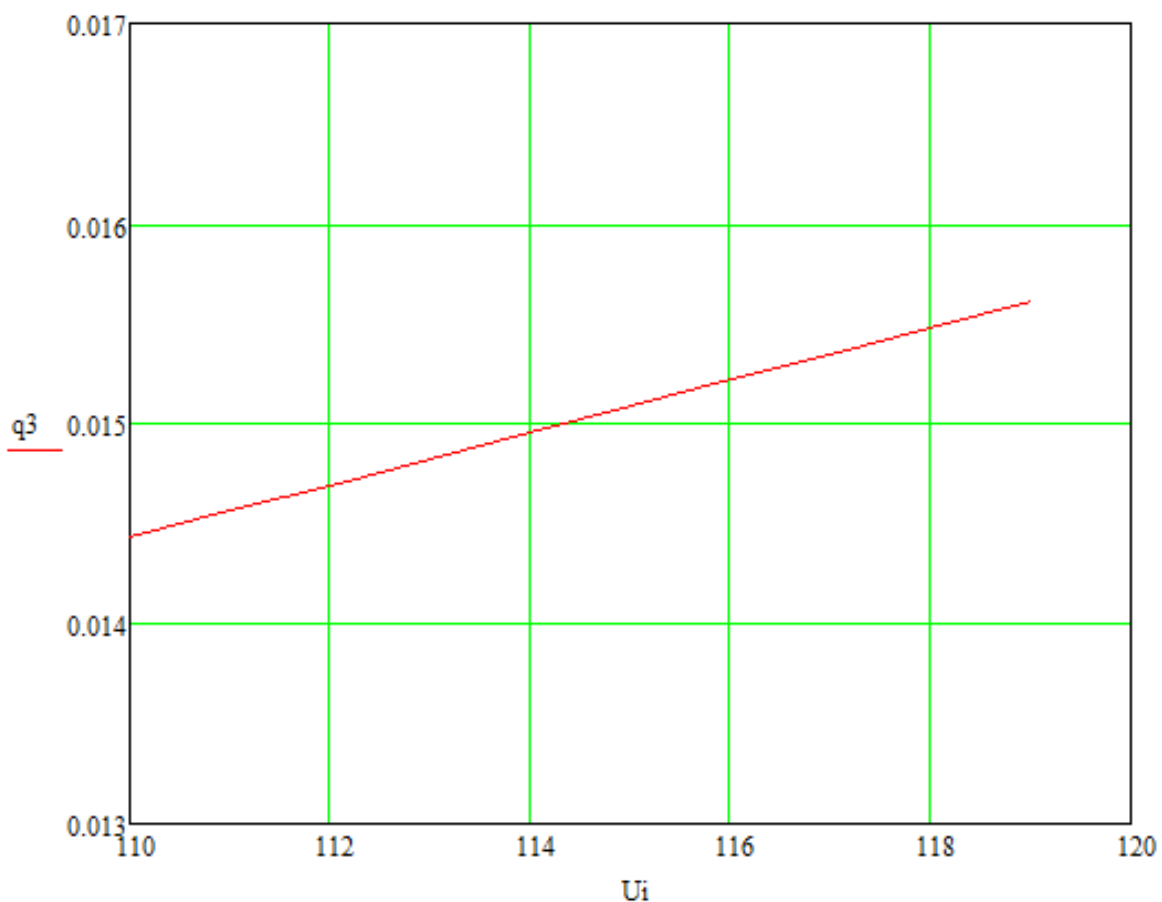


Рис. 7. Графік залежності похибки від напруги при використанні структурного методу вимірювання

Отже, при використанні структурного методу повністю втрачається залежність похибки вимірювання від неінформативної складової сигналу, що дає змогу зменшити загальну похибку системи.

На основі теоретичного аналізу похибок вимірювання малих інформативних параметрів на фоні великих неінформативних параметрів отримано узагальнюючі матриці адитивних та мультиплікативних похибок багатоканальних фільтрів вищих гармонік вимірювань, що не перевищує 0,02% і симетричних складових трифазної мережі та запропоновано структурний метод корекції цих похибок, який дозволяє більше ніж на порядок підвищити точність вимірювання параметрів якості сигналів мережі.

Висновки

1. За допомогою структурного методу вимірювання проведено аналіз похибок вимірювання малих інформативних параметрів на фоні великих інформативних параметрів та встановлено.

2. У результаті досліджень встановлено, що значення відносної похибки вимірювання усталеного відхилення напруги можливо зменшити до 0,02%.

3. Проведено дослідження багатоконтурної вимірювальної системи за допомогою методу вписаних трапецій та таблиці значень перехідних функцій професора В. В. Солодовникова та встановлено, що можливо покращати криву перехідного процесу системи для визначення динамічної похибки одиничного стрибка.

ЛІТЕРАТУРА

1. Таранов С. Г. Самонастраивающиеся измерительные приборы / Таранов С. Г. – К. : Наук. думка, 1981. – 182 с.
2. Таранов С. Г. Анализ динамики самонастраивающихся измерительных приборов с помощью обобщенной модели / С. Г. Таранов, А. С. Оленцки, Ю. Ф. Тесик // Моделирование в электротехнике, электронике и светотехнике: Междунар. науч.-техн. конф. МЭЭС'05, 14-16 сентября 2005: тезисы докл. – С. 11-13.
3. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. ГОСТ 13109-97. – [Чинний від 1999-06-18]. – К. : Госстандарт України, 1999. – 32 с. (Межгосударственный стандарт стран СНГ).

Самелюк А. С., Черниченко М. Ю., Шевченко К. Л.

Разработка методов и средств измерения параметров и качества электрической энергии

Киевский национальный университет технологий и дизайна

В статье рассмотрены оценка динамической погрешности многоконтурной системы с помощью метода вписанных трапеций и структурный метод измерения значений относительной погрешности измерения установившегося отклонения напряжения. Установлено, что оценка и определение больших и малых информативных показателей качества электроэнергии, является важным мероприятием для контроля за уровнем качества электрической энергии. Приведенные теоретические и экспериментальные результаты исследований параметров и качества электроэнергии.

Ключевые слова: *электроэнергия, показатели качества, динамическая погрешность, относительная погрешность, структурный метод, метод трапеций*

Sameluk O. S., Chernichenko M. Y., Shevchenko K. L.

Development of methods and means of measurement parameters and the quality of electric energy

Kiev National University of Technology & Design

The article describes the evaluation of multicontour dynamic error system using the method of inscribed trapezoids and structural method of measurement values of the relative error of measurement of steady voltage deviation. It was found that the assessment and identification of large and small informative power quality is an important measure to control the level of quality of electric energy. These theoretical and experimental results of the research parameters and power quality.

Keywords: *electric power quality parameters, the dynamic error, the relative error, the structural method, the trapezoids method*